

宁南山区经济林降雨集流机理试验研究

丁广¹, 张维江^{1,2,3}, 李娟^{1,2,3}, 王旭东¹, 马芳¹, 姜茂付¹, 姜瑞洋¹, 黄艳¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控
工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 探究宁夏回族自治区固原市原州区彭堡镇红梅杏经济林降雨集流渗灌系统的雨水收集能力,明确当地红梅杏经济林降雨分配特征,为降雨集流的定量研究和该地区集雨农业的发展提供科学依据。[方法] 以当地红梅杏为研究对象,采用对比观测的方法,以天然降雨和人工模拟降雨相结合的方式,对红梅杏降雨集流过程进行观测与模拟。[结果] 2019年7—9月在彭堡红梅杏基地观测到的总计19场降雨数据,天然降雨中5 mm以下的降雨次数占到天然降雨总次数的83.3%,天然降雨与人工模拟降雨的相似系数为0.91,总体的集流率为61.29%,渗灌系统截留率为27.12%,林冠截留率为11.95%。[结论] 试验地小降雨频率大,两种降雨方式具有较高相似性,降雨集流渗灌系统集流效率高,渗灌系统的集流量与降雨量成线性关系($R^2=0.9955$),集流率与降雨量成对数关系($R^2=0.6939$)。

关键词: 降雨; 集流; 红梅杏; 宁南山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)03-0014-06

中图分类号: P332.1; TV213.9

文献参数: 丁广, 张维江, 李娟, 等. 宁南山区经济林降雨集流机理试验研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3):14-19. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.003; Ding Guang, Zhang Weijiang, Li Juan, et al. An experimental study on rainfall-collecting mechanism of economic forest in mountainous area of Southern Ningxia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3):14-19.

An Experimental Study on Rainfall-Collecting Mechanism of Economic Forest in Mountainous Area of Southern Ningxia

Ding Guang¹, Zhang Weijiang^{1,2,3}, Li Juan^{1,2,3},

Wang Xudong¹, Ma Fang¹, Jiang Maofu¹, Jiang Ruiyang¹, Huang Yan¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia

750021, China; 2. Engineering Technique Research Center for Water Saving Irrigation and Water

Resources in Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The rainwater collection capacity of the rainfall collection and infiltration irrigation system of the red plum apricot economic forest in the Pengpu Town of Yuanzhou District, Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region were investigated, in order to clarify the characteristics of rainfall distribution and provide a scientific basis for the quantitative study of rainfall collection and the development of rainwater-harvesting agriculture in the area. [Methods] The local red plum apricot was used as the research object. Based on the measured data of natural rainfall and artificial simulated rainfall, the rainfall collection process for the red plum apricot economic forest was observed and simulated. [Results] From July to September 2019, 19 rainfall data were observed at the red plum apricot base in Pengpu Town, and the number of rainfalls of less than 5 mm accounted for 83.3% of the total natural rainfall. The correlation coefficient between natural rainfall and artificial rainfall was 0.91, the total collection rate was 61.29%, the interception rate of the infiltration irrigation system was 27.12%, and the canopy interception rate was 11.95%. [Conclusion] The small rainfall frequency in the test field was high, the two rainfall methods had a high similarity, and the rainfall collection and infiltration irrigation system had a high collection efficiency. The rainfall collection of the

收稿日期: 2020-02-01

修回日期: 2020-03-30

资助项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目“宁南山区生态恢复与水资源潜力开发与示范”(2018ZDKJ0040)

第一作者: 丁广(1995—), 男(满族), 河北省承德市人, 硕士研究生, 研究方向为水资源调控理论与技术。Email: 1039048071@qq.com。

通讯作者: 张维江(1963—), 男(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区水资源调控及水土保持等方面的研究。Email: zwjiang@263.net。

infiltration irrigation system was linearly related to rainfall ($R^2 = 0.9955$), and the rainfall collection rate was logarithmically related to rainfall ($R^2 = 0.6939$).

Keywords: rainfall; catchment; red plum apricot; mountainous area of Southern Ningxia

黄土高原半干旱地区是典型的旱作农业区。中国农业用水长期存在用水总量大,利用效率低的特点^[1]。由于气候条件限制和水土流失、干旱缺水等水资源问题,制约了该地区发展。雨水的高效利用可以作为缓解水土流失和干旱缺水等水资源问题的有效途径^[2]。一般认为降雨量小于5 mm时,由于降雨无法有效渗入到深层植物根部而被认为是无效降雨,造成了一定程度水资源的浪费。采用集流的方式搭配渗灌技术对雨水进行高效利用,是本文的重要理念。杨兴国等^[3]对甘肃雨养农业区进行的雨水收集利用试验研究,在一定程度上可以缓解干旱问题。孙惠民等^[4]对准格尔旗示范区干旱缺水问题进行研究,提出北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业发展模式。森林植被的截留现象是对大气降水的第一次分配,林冠截留量在降雨的再分配中占有较大比重,根据当前的研究,林冠截留量占总降水量的15%~50%,多年生乔木的年均林冠截留量可达到年降水量的30%以上^[5-7]。目前国内外研究中,对林冠截留相关关系及应用修正的Gash模型的数值模拟进行了深入研究^[8-11]。但是缺乏对于干旱地区经济林作物集雨技术的定量研究。宁南地区的红梅杏果实成熟期较早,售价较高,经济效益明显。经过多年培育,红梅杏果实品质优良,营养丰富,近年来不仅在当地发展初具规模,在适宜种植地区也受到大力推广,市场前景较好^[12]。本文针对宁南山区水资源的“量少、分散、质差、蒸发渗漏损失大、利用效率低”等问题,通过对该区域红梅杏铺设降雨集流装置并结合相关研究,以期充分挖掘水资源的潜力,将雨水资源进行高效利用,

在增加天然水资源供给量的同时,为当地集雨农业发展、灌溉制度的确定及防止水土流失提供科学依据,并为宁南山区经济林提高综合效益和产业发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于宁夏回族自治区固原市原州区,地理坐标为106°13'E,36°14'N,地处内陆中纬度地带,当地地貌为宁南黄土高原丘陵和六盘山山地,区域内山多川少,海拔高度为1640 m,气候属内陆暖温带半干旱区,降水量较少、蒸发量较大。区域内多年平均气温6.75℃,无霜期144 d,年降水量450 mm,近几年降水量呈增加趋势,降水基本集中在7~9月份,年蒸发量800~1200 mm,多年平均日照时2250~2700 h。该区域的土质组成质地较为单一、土层较为深厚、地下水埋深较低。试验所需观测红梅杏树树龄均为4 a,林相整齐,单株差异较小。

1.2 样地设置

如图1所示,在试验区内选取3个2 m×2.5 m红梅杏试验样地,用于观测红梅杏林冠截留量。红梅杏树位于样地中央,试验中对渗灌器做不透水处理,作为降雨的集水装置,在距树两侧50 cm处处理置渗灌器。样地内田面四周高,向渗灌器口部倾斜,利于集水。田面处理完成后铺设薄膜,将其作为集雨面。设置3个空白样地,全部铺设降雨集流装置,作为对比样地。试验所选取红梅杏树样本平均树高3.4 m,平均地径7.6 cm。

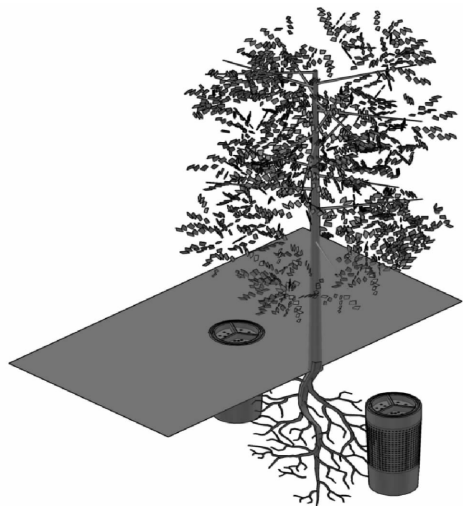


图1 对比样地及红梅杏样地布置示意图

1.3 降雨试验设计

降雨集流观测试验分为对比样地和红梅杏样地两种条件下的降雨集流观测。其中天然降雨每项观测均在选取的样地内记录结果,人工模拟降雨在选取的样地内重复试验并记录结果。

根据水量平衡原理,将次降雨分为降雨量(天然降雨、人工模拟降雨),渗灌系统截流量,林冠截留量,渗灌系统集流量。

$$\text{对比样地: } P = I_{\text{渗}} + W \quad (1)$$

$$\text{红梅杏样地: } P = I_{\text{渗}} + I_{\text{林}} + W \quad (2)$$

式中: P 为降雨量(mm); $I_{\text{渗}}$ 为渗灌系统截流量(mm); $I_{\text{林}}$ 为林冠截留量(mm); W 为渗灌系统集流量(mm)。

受限于天然降雨的不可控性,试验采用人工模拟降雨的方式补充观测试验。模拟降雨采用人工模拟降雨设备进行。该设备主要由动力系统(水泵、变压器)、输配水系统(水箱、水管、喷头)、支撑系统(支撑骨架、承重底座)3大部分组成,在试验开始前通过预试验进行校准。

试验在 2019 年 7—9 月进行,此时间段红梅杏枝叶最为茂盛。根据该地区 50 a 的降雨历史资料^[13-14],经统计分析,0~16 mm 降雨占年降雨量平均值达到了 58.4%,因此人工模拟降雨试验选取降雨量 4.2, 7.2, 10.0, 12.6, 15 mm 以代表地区特征和满足大雨量试验需要,降雨强度为 4.7 mm/h,设计为天然降雨强度平均值。试验中天然降雨和人工模拟降雨的观测试验在保证初始条件基本一致的情况下分开进行,将两种降雨方式分别应用于两种条件的样地进行观测,分析试验结果得出集流机理。

1.4 雨量测量

(1) 降雨量的测定。在红梅杏树附近的空旷地设置翻斗式雨量计,每次降雨后雨量计所得数据即为天然降雨量。人工模拟降雨试验中以不同的降雨量等级为标准,相应的试验中所模拟的降雨量大小即为人工模拟降雨量。

(2) 渗灌系统集流量的测定。对于所选的样地均按照标准铺设降雨集流渗灌系统。在样地附近低洼处放置大型塑料桶,将集水器中的雨水利用虹吸原理抽出到塑料桶中,降雨结束后,测量桶中所得雨水即为渗灌系统的集流量。最终数据取同一条件下试验结果的平均值。

(3) 渗灌系统截流量的测定。在对照样地的条件试验下,通过水量平衡原理(公式 1)计算得到。即降雨量减去渗灌系统集流量。

(4) 林冠截留量的测定。在两种样地条件试验

下,先得出渗灌系统截留量,再通过水量平衡原理〔公式(2)〕计算得到。即降雨量减去渗灌系统集流量和渗灌系统截流量。

2 结果与分析

2.1 研究地降雨特征

根据 2019 年 7—9 月在原州区彭堡镇红梅杏基地观测到的总计 19 场降雨数据(天然降雨观测到 12 场,人工模拟降雨 7 场),其中天然降雨和人工模拟降雨同雨量降雨 3 场。试验期间天然降雨总量为 35.50 mm,单场降雨最大值为 7.40 mm,最小值为 1.40 mm,平均每场降雨 2.96 mm。试验期间人工模拟降雨总量为 61.40 mm,单场降雨最大值为 15.00 mm,最小值为 4.20 mm,平均每场降雨 8.77 mm。根据所得天然降雨观测数据并按照雨量等级分析,结果如图 2 所示。在研究期间所观测到的 12 场降雨中,降雨量在 0~2 mm 的有 4 场,占到天然降雨总次数的 33%;降雨量在 2~4 mm 的有 5 场,占到天然降雨总次数的 42%;降雨量在 4~6 mm 的有 2 场,占到天然降雨总次数的 17%;降雨量在 6~8 mm 的有 1 场,占到天然降雨总次数的 8%。观测周期内降雨主要以小雨量级为主,5 mm 以下的降雨次数为 10 次,占到天然降雨总次数的 83.3%,说明此次试验在短周期内观测到的天然降雨中,小降雨出现频率较高。

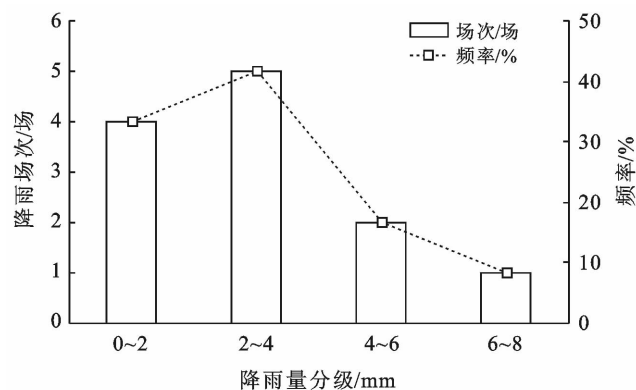


图 2 天然降雨的雨量等级分布

2.2 天然降雨与人工模拟降雨结果分析

试验期间共观测到 12 场天然降雨,均为小雨,最大降雨量 7.40 mm。受人工模拟降雨装置下限影响,根据天然降雨结果,观测到 7 场人工模拟降雨中,设计匹配相同降雨量 3 场。从表 1 可以看出,人工模拟降雨的集流效果较天然降雨略偏大,这是受人工模拟降雨条件影响,首先野外人工模拟降雨装置高度受限,其次在雨量一定的情况下为将降雨控制在有效降雨面积内,人工模拟降雨较天然降雨更集中,导致人

工模拟降雨条件下渗灌系统的集流效率更高。天然降雨集雨量与人工模拟降雨集雨量的比值在两种样地条件下均随着降雨量的增加而增加;在相同降雨量情况下,红梅杏样地的集流效果较对比样地略小,说明红梅杏不光造成林冠截留,对两种降雨方式也存在影响。对比样地条件下,天然降雨集流量与人工模拟降雨集流量比值的平均值为 0.925,红梅杏样地为 0.895,两者平均值为 0.91,说明人工模拟降雨结果相似性较高。

在两种样地条件下,利用人工模拟降雨数据得到

的拟合方程可以计算出在相应的天然降雨雨量等级下的集流量,通过图 3 比较同降雨量下两种降雨方式得到的集流量,可以看出,人工模拟降雨计算值与天然降雨实测值基本一致,人工模拟降雨实测值都分布在天然降雨预测曲线附近,3 个同雨量情况下两种降雨方式实测值接近。

人工模拟降雨的雨量较大,天然降雨集中在 5 mm 以下,将人工模拟降雨结果作为补充样本,结合到天然降雨样本序列中,可以得到较为完整的降雨量与集流量相关关系。

表 1 宁南山区经济林同雨量级下两种降雨方式比较

降雨量/ mm	对比样地集流量/mm		天然降雨集流量/ 人工模拟降雨集流量	红梅杏样地集流量/mm		天然降雨集流量/ 人工模拟降雨集流量
	天然降雨	人工模拟降雨		天然降雨	人工模拟降雨	
4.20	3.00	3.30	0.909	2.48	2.84	0.873
5.00	3.54	3.86	0.917	3.00	3.37	0.890
7.40	3.73	6.04	0.949	4.53	4.92	0.921

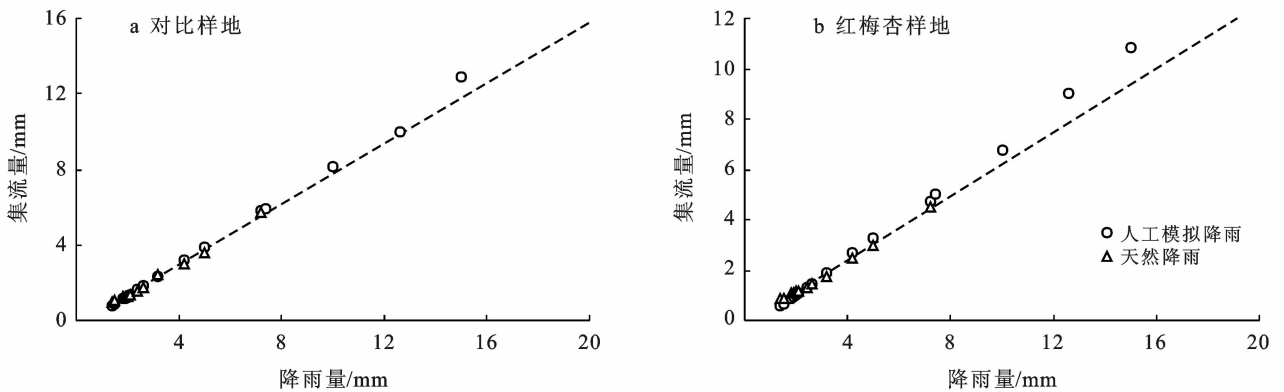


图 3 宁南山区经济林对比样地及红梅杏样地两种降雨方式结果比较

2.3 渗灌系统集流量

2.3.1 对比样地渗灌系统集流量 采用两种降雨方式数据结合后共 16 场降雨结果进行分析,试验期间观测到降雨总量 80.30 mm,渗灌系统集流量总量为 62.11 mm,占降雨总量的 77.35%,单场降雨的集流量在 1.01~12.89 mm 之间,平均集流量 3.88 mm。从图 4a 可以看出,集流量随着降雨量的增加而增大,集流量与天然降雨量有着显著的线性关系,其拟合方程为:

$$y=0.8549x-0.4083 \quad (R^2=0.9967) \quad (3)$$

从图 4b 可以看出,集流率随着降雨量的增加而逐渐增大,但是增大的趋势逐渐减小,集流率与林外天然降雨量存在对数关系,其拟合方程为:

$$y=0.0707\ln x+0.6397 \quad (R^2=0.7057) \quad (4)$$

2.3.2 红梅杏样地渗灌系统集流量 试验期间观测到红梅杏样地渗灌系统集流量总量为 52.14 mm,占

降雨总量的 64.93%,单场降雨的集流量在 0.84~10.85 mm 之间,平均集流量 3.26 mm。从图 5a 可以看出,在红梅杏样地试验中,集流量同样随着降雨量的增加而增大,集流量与天然降雨量同样有着显著的线性关系,其拟合方程为:

$$y=0.7312x-0.411 \quad (R^2=0.9955) \quad (5)$$

从图 5b 可以看出,集流率随着降雨量的增加而逐渐增大,但是增大的趋势逐渐减小,集流率与林外天然降雨量存在对数关系,其拟合方程为:

$$y=0.0592\ln x+0.5354 \quad (R^2=0.6939) \quad (6)$$

两种样地条件下的试验结果呈现出降雨量与集流量、降雨量与集流率的关系一致。芦新建等^[15]、刘胜涛等^[16]对林冠截留量的研究中,得出了穿透雨量和林外降雨量的拟合方程,该方程中的常数为林冠饱和持水量,在本次研究中将穿透雨量进行收集观测即集流量,从本次试验中所得降雨量与集流量的拟合方程可以得出红梅杏林冠饱和持水量为 0.411 mm。

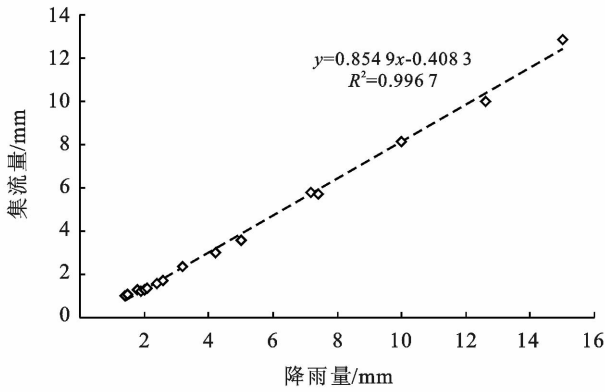


图 4 宁南山区经济林对比样地降雨量和集流量及集流率的关系

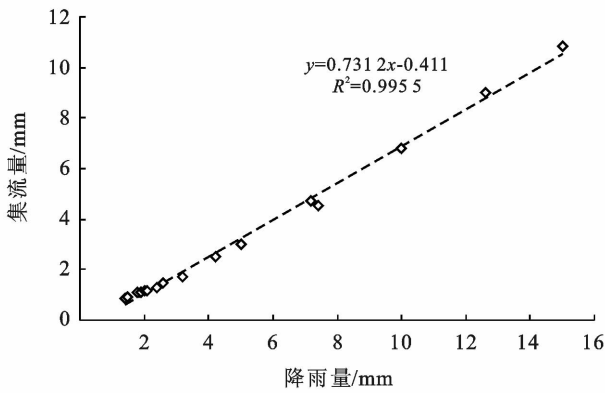
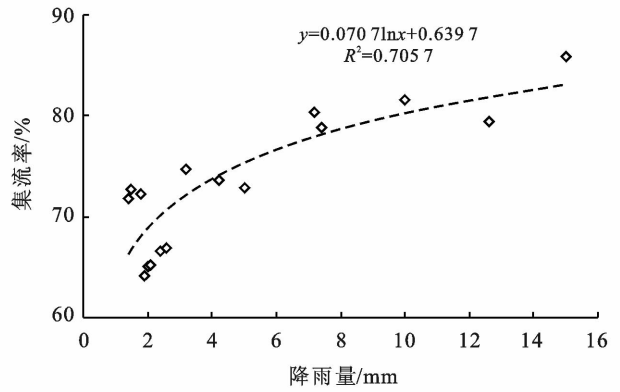
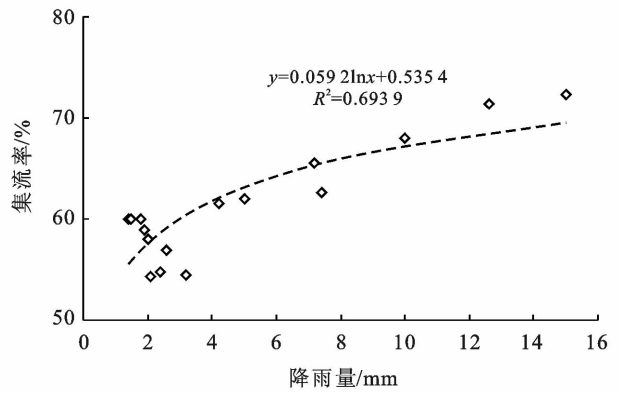


图 5 宁南山区经济林红梅杏样地降雨量和集流量及集流率的关系



2.4 林冠截留率与降雨再分配

试验期间通过观测对比样地集流量,根据水量平衡原理[公式(1)],得到渗灌系统截留量为 18.19 mm,占降雨总量的 22.65%,单场降雨的渗灌系统截留量在 0.40~2.60 mm 之间,平均每场降雨渗灌系统截留量为 1.14 mm,单场降雨的渗灌系统截留率在 14.10%~35.80% 之间,平均渗灌系统截留率为 27.12%。通过观测红梅杏样地集流量,根据水量平衡原理(公式 2),试验期间观测到红梅杏林冠截留量为 9.97 mm,占降雨总量的 12.42%,单场降雨的林冠截留量在 0.10~2.04 mm 之间,平均每场降雨林冠截留量为 0.62 mm,单场降雨的林冠截留率在 5.25%~20.18% 之间,平均林冠截留率为 11.95%。根据现有对林冠截留量的观测试验中,所测得的树干茎流量较小,一般占次降雨量的 0.3%~3.0%,次降雨中蒸发量一般不到 3%,相比于最主要的林冠截留量基本可以忽略不计^[17-18]。此次研究内容为针对当地红梅杏渗灌系统的雨水收集能力分析,结果观测基本和次降雨同步进行,对蒸发量、树干茎流量等暂不深入研究。从图 6 可以看出,随着降雨量增加,林冠截留率逐渐减少,说明林冠截留能力具有一定局限性。从整体趋势来看,小雨量级降雨的林冠截留率比大雨量级的截留率大,小雨量级降雨的场次多,次降雨的截留量较少。大雨

量级截留量多,截留率偏小,这与降雨量的大小有关。林冠截留量和降雨之间存在线性关系,其拟合方程为:

$$y = -0.0079x + 0.1445 \quad (R^2 = 0.7458) \quad (7)$$

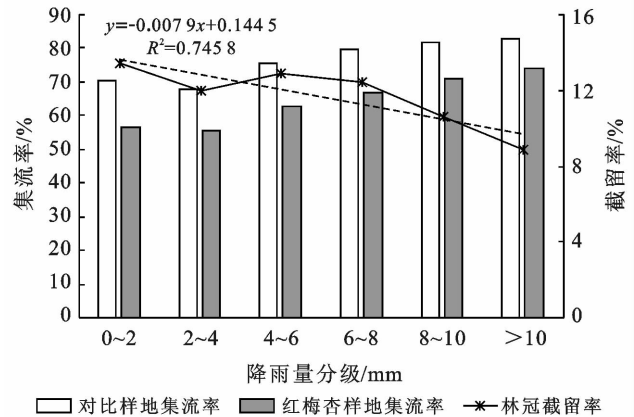


图 6 宁南山区经济林降雨量和集流率及截留率的关系

试验期间共观测分析 16 场降雨,红梅杏样地降雨总量 P 为 80.30 mm,其中收集流量 W 为 52.14 mm,渗灌系统截留量 $I_{\text{渗}}$ 18.19 mm,林冠截留量 $I_{\text{林}}$ 9.97 mm,分别占降雨总量的 64.93%,22.65% 和 12.42%。从表 2 可以看出,试验观测分析的降雨中,主要集中在小雨量级,0~5 mm 降雨占到降雨总次数的 62.5%。平均集雨量、平均渗灌系统截留量和平均林冠截留量都基本与降雨量呈正相关。

表2 宁南山区红梅杏林不同雨量级雨量再分配

雨量 分级/mm	降雨 场次/场	降雨 总量/mm	场均降 雨量/mm	场均集 雨量/mm	平均集 雨率/%	平均渗灌系统 截留量/mm	平均渗灌系统 截留率/%	平均林冠 截留量/mm	平均林冠 截留率/%
0~2	4	6.6	1.65	0.94	56.81	0.49	29.78	0.22	13.41
2~4	5	12.3	2.46	1.37	55.69	0.80	32.33	0.29	11.98
4~6	2	9.2	4.6	2.88	62.60	1.13	24.48	0.59	12.92
6~8	2	14.6	7.3	4.90	67.09	1.49	20.46	0.91	12.45
8~10	1	10	10	7.10	71.00	1.84	18.40	1.06	10.60
>10	2	27.6	13.8	10.19	73.82	2.39	17.35	1.22	8.83

3 讨论

(1) 本文重点研究了彭堡红梅杏林地应用渗灌系统后的集雨效果,结合前期相关研究,发现该系统集雨效果良好,促进了红梅杏叶面积指数等指标的提。此次试验对象为红梅杏,观测结果同其他^[19-20]研究相比,本研究更具区域针对性,符合当地生产需求,为后续研究提供了基础,对宁南山区集雨农业的发展起到了参考作用。降雨集流渗灌系统旨在提高雨水有效利用率,将收集到的雨水直接输送到红梅杏根系,减少了降雨在自然入渗过程中的损失。该系统能够提高旱区经济林的综合效益,具有较高的推广价值。

(2) 降雨、截留、集雨是一个复杂的动态变化过程,不仅与树种类别有关,还受降雨过程中降雨特征及区域环境因子的影响。本研究选择降雨量进行重点研究,其余因素按照平均值消除误差,后续可以选择多影响因子进行研究,并对截留进行更详细的类别分析。

(3) 利用人工模拟降雨观测结果补充试验样本,弥补了天然降雨的不可控性这一不足之处,但其效果受到多方面因素影响,包括外界气象环境、人工操作等。试验证明两种降雨方式所得结果相似性较高,但并不能做到完全代替天然降雨。

(4) 目前针对降雨再分配的研究中,基本集中于林冠截留的研究,本文结果显示红梅杏林冠截留率为11.95%,现阶段研究中,中国各类森林生态系统的平均林冠截留率范围基本在11.4%~36.5%之间,本文结果在其区间中处于较低水平,其原因可能是红梅杏树本身特性导致林冠截留有限。

4 结论

(1) 试验期间天然降雨集中在小降雨区间,5 mm以下降雨占比83.3%。试验中采用的人工模拟降雨方式同天然降雨相比,相似系数为0.91,人工模拟降雨结果略高,但仍具有较高的相似性、适用性。

(2) 试验期间共观测分析16场降雨,降雨总量为80.30 mm,其中收集雨量为52.14 mm,渗灌系统截留量为18.19 mm,林冠截留量为9.97 mm,分别占

降雨总量的64.93%,22.65%和12.42%。平均渗灌系统集流率为61.29%,平均渗灌系统截留率为27.12%,平均林冠截留率为11.95%。

(3) 从试验观测得到的拟合方程可以得出,集流量随着降雨量的增加而增大,集流量与降雨量有着显著的线性关系。集流率随着降雨量的增加而逐渐增大,但是增大的趋势逐渐减小,集流率与降雨量存在对数关系。小雨量级降雨的集流率偏小且不稳定,随着雨量级的增加,集流率成对数关系增加且较稳定。

[参 考 文 献]

- [1] 杨德军,张土乔,张科锋. 土壤水动力学模型及在 SPAC 系统建模中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2011:1-3.
- [2] 余海龙,黄菊莹,肖国举. 黄土高原半干旱区雨水资源化研究综述[J]. 人民黄河,2010,32(1):46-47.
- [3] 杨兴国,张旭东,杨启国. 黄土高原雨养农业区雨水集蓄应用研究[J]. 自然资源学报,2004,19(3):300-306.
- [4] 孙惠民,程满金,郑大玮,等. 北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业发展模式[J]. 应用生态学报,2005,16(6):1072-1076.
- [5] 尹准生,孙长忠,赵明扬,等. 黄土高原半干旱区油松人工林林冠层截留降雨模拟与分析[J]. 中国水土保持科学,2015,13(3):45-50.
- [6] 盛雪娇,王曙光,关德新,等. 辽宁东部山区落叶松人工林林冠降雨截留观测及模拟[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3021-3028.
- [7] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe [J]. Journal of Hydrology, 2007,335(1/2):37-54.
- [8] Gerrits A M J, Pfister L, Savenije H H G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest [J]. Hydrological Processes, 2010,24(21):3011-3025.
- [9] Savenije H H G. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary [J]. Hydrological Processes, 2004,18(8):1507-1511.
- [10] 李想,王亚明,孟晨,等. 基于幼树模拟降雨实验的树冠动态截留模型[J]. 北京林业大学学报,2018,40(4):43-50.

(3) 分析泥石流堰塞坝坝体破坏机理,得到下游坡面泥沙起动条件: $(C_D + C_L \tan \Phi) 0.75 \rho u_0^2 \geq D(\gamma_s - \gamma)(\cos \theta \tan \Phi - \sin \theta)$

[参 考 文 献]

- [1] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988,100(7):1054-1068.
- [2] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods [J]. Engineering Geology, 2003,69(1/2):83-97.
- [3] 柴贺军,刘汉超,张倬元,等.天然土石坝稳定性初步研究[J].地质科技情报,2001,20(1):77-81.
- [4] Cheng Zunlan, Dang Chao, Liu Jingjing, et al. Experiments of debris flow damming in Southeast Tibet [J]. Earth Science Frontiers, 2007,14(6):181-185.
- [5] 陈德明.泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D].北京:中国水利水电科学研究院,2000.
- [6] 吴积善,康志成,田连权,等.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京:科学出版社,1990.
- [7] 杜榕桓,王立伦,王彦龙,等.西藏古乡沟冰川泥石流的形成与发展[J].中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊,1984(4):36-47.
- [8] 吕立群,王兆印,漆力健,等.西藏古乡沟泥石流堰塞湖演化规律[J].泥沙研究,2015(5):14-18.
- [9] 朱平一,程尊兰,游勇.川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J].自然灾害学报,2000,9(1):80-83.
- [10] 陈宁生,陈瑞.培龙沟泥石流及其堵江可能性探讨[J].山地学报,2002,20(6):738-742.
- [11] 余斌,杨永红,苏永超,等.甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J].工程地质学报,2010,18(4):437-444.
- [12] 刘宁.舟曲白龙江堰塞排险与应急疏通减灾工程管理认知[J].中国工程科学,2011,13(1):25-30.
- [13] 余斌,马煜,吴雨夫.汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J].工程地质学报,2010,18(6):827-836.
- [14] 游勇,陈兴长,柳金峰.四川绵竹清平乡文家沟“8·13”特大泥石流灾害[J].灾害学,2011,26(4):68-72.
- [15] 倪化勇,郑万模,唐业旗,等.汶川震区文家沟泥石流成灾机理与特征[J].工程地质学报,2011,19(2):262-270.
- [16] 唐川,李为乐,丁军,等.汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J].地球科学,2011,36(1):172-180.
- [17] 甘建军,孙海燕,黄润秋,等.汶川县映秀镇红椿沟特大型泥石流形成机制及堵江机理研究[J].灾害学,2012,27(1):5-9.
- [18] 卜祥航,唐川,屈永平,等.烧房沟滑坡型泥石流工程治理及效果分析[J].工程地质学报,2016,24(2):220-227.
- [19] 黄翔超.汶川震区典型泥石流堵江可能性分析[D].成都:成都理工大学,2012.
- [20] 郭晓军,向灵芝,周小军,等.高家沟泥石流和深溪沟泥石流灾害特征[J].灾害学,2012,27(3):81-85.
- [21] 高波,任光明,王军,等.四川汶川高家沟泥石流形成条件与启动机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):1-5.
- [22] 吴积善,程尊兰,耿学勇.西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J].山地学报,2005,23(4):4399-4405.
- [23] 匡尚富,汪小刚,黄金池,等.堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估[J].中国水利,2008(16):17-21.
- [24] 陈德明,王兆印,何耘.泥石流入汇对河流影响的实验研究[J].泥沙研究,2002(3):22-28.
- [25] 徐永年,匡尚富,黄永键,等.泥石流入汇的危险性判别指标[J].自然灾害学报,2002,11(3):33-38.
- [26] 唐川,黄润秋,黄达,等.金沙江美姑河牛牛坝水电站库区泥石流对工程影响分析[J].工程地质学报,2006,14(2):145-151.
- [27] 党超,程尊兰,刘晶晶.泥石流堵塞主河条件[J].山地学报,2009,27(5):557-563.

(上接第 19 页)

- [11] 杨中文,唐甜华,陈野,等.樟树林冠截留模拟试验研究[J].长江科学院院报,2011,28(3):5-9.
- [12] 陈培琴,黄泽云,马廷贵,等.宁夏“红梅杏”设施盆栽促早栽培技术[J].中国果树,2018(4):97-100.
- [13] 冯平,鲁小清.宁夏固原地区水文特性分析[J].水土保持通报,1993,13(1):51-59.
- [14] 黄鹤,张维江,李娟,等.原州区近 60 年降水特征分析[J].农业科学研究,2019,40(3):32-36.
- [15] 芦新建,贺康宁,王辉,等.应用 Gash 模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留的模拟[J].水土保持学报,2014,28(4):44-48.
- [16] 刘胜涛,高鹏,李肖,等.江西大岗山杉木人工林降雨截留特征及修正 Gash 模型的模拟[J].水土保持学报,2015,29(2):172-176.
- [17] 李苗,邓永成,史红文.武汉市公园绿地植物群落冠层雨水截留能力研究[J].黑龙江农业科学,2018(7):112-116.
- [18] 殷晖.森林植被林冠截留降水模型初探[J].现代园艺,2012(8):149.
- [19] 黄进,胡海波,张家洋,等.北亚热带毛竹林林冠截留特征的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(2):31-34.
- [20] 方书敏,赵传燕,荐圣淇,等.陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟[J].应用生态学报,2013,24(6):1509-1516.